农机装备数字孪生：从概念到应用

郭大方[1,2]，杜岳峰[1,2*]，武秀恒[1,2]，侯思余[1,2]，栗晓宇[1,2]，
张延安[1,2]，陈　度[1,2]

（1. 中国农业大学 工学院，北京 100083；2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室，北京 100083）

摘　要：［**目的/意义**］农机装备是先进农业生产理念落地的物质支撑，如何提升农机装备设计制造水平及运维管控能力，充分发挥装备性能，是智慧农业未来发展所面临的核心问题。数字孪生是一种融合多种信息技术、促进虚实交互融合的先进理念，有助于更加清晰地认识农机装备及其运行过程，从而解决从设计到回收阶段的复杂性问题，进而全方位地提升农机装备作业质量，更好地满足农业生产需求。［**进展**］首先围绕数字孪生在农机装备领域的应用，总结数字孪生的研究动态，分析农机装备数字孪生的概念与内涵，提出系统性的体系架构。然后从宏观发展、系统实现、项目实施多个角度阐述农机装备数字孪生的实现路线。最后介绍农机装备数字孪生的典型应用场景和案例。［**结论/展望**］数字孪生为农机装备转型升级提供了新方法，为提升农业机械化生产水平提供了新途径，为实现智慧农业提供了新思路。本文可为农机装备数字孪生相关研究工作的开展提供参考，为数字孪生赋能智慧农业和智能装备奠定理论基础。

关键词：农机装备；数字孪生；信息技术；虚拟仿真；智慧农业

中图分类号：S24；S232　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**SA202305007

引用格式：郭大方, 杜岳峰, 武秀恒, 侯思余, 栗晓宇, 张延安, 陈度 . 农机装备数字孪生:从概念到应用[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(2): 149-160.

GUO Dafang, DU Yuefeng, WU Xiuheng, HOU Siyu, LI Xiaoyu, ZHANG Yan'an, CHEN Du. Digital twin for agricultural machinery: From concept to application[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(2): 149-160.

1　引　言

农机装备是融合生物和农艺技术，集成先进设计、制造与智能控制、新一代信息通信、新材料等高新技术的信息化、智能化的先进装备。随着全球新一轮科技革命和产业变革加速，信息技术、传感技术、生物技术、机器人技术、新材料技术、新能源技术广泛渗透和交叉融合，新一代人工智能、大数据、物联网基础理论和技术实现突破和深入应用，农机装备正向大型化、高效率、多功能、复式联合作业、信息化、智能化、精准化、高效化、节能化和服务化方向快速发展。

智慧农业工程科技作为当前国际上现代化农业技术发展前沿，智慧农业的实施需要智能农机装备的支撑，智能农机装备产业提升也需要智慧农业的引领。智慧农业和智能农机装备相辅相成、紧密联系，二者融合发展是现代农业的必然趋势，其互动和协同作用可以实现农业生产效率的大幅提高和质量的稳步提升，同时减少资源浪费和环境污染，为农业的可持续发展提供新动能。

随着中国加快推动农业生产机械化和农机装备产业发展，主要作物生产“无机可用”的问题已基本解决，农业生产从主要依靠人力畜力转向主要依靠机械动力，进入了机械化为主导的新阶段[1,2]。但是，受制于农机装备及农业生产复杂、农机企业

收稿日期：2023-05-07

基金项目：国家自然科学基金（52175258）；现代农业装备设计与智能制造创新平台（2021XDRHXMPT29）

作者简介：郭大方，研究方向为农机装备数字孪生与智能控制技术。E-mail：dafang.guo@cau.edu.cn

*通信作者：杜岳峰，博士，副教授，研究方向为智能农机装备与数字孪生。E-mail：dyf@cau.edu.cn

技术积累不足、市场需求多样等多重因素，中国农机装备行业中依然存在诸多问题。在研发制造方面，农机装备设计研发缺乏有效支撑，导致机器作业质量差、效率低、智能化程度低；农机企业科技创新能力不强，缺乏具有核心竞争力的高端农机装备。在运维管控方面，农场和个人用户均缺乏合理有效运用农机装备的方法，没有充分发挥装备应有的作业效果；农机装备普遍存在重使用、轻维护的现象，维护维修制度不健全、模式落后、配套不完全等问题突出。目前国产农机装备仍然难以满足中国农业农村现代化发展以及建设农业强国的战略需求，未来农机装备将从满足功能性需求向全程全面高质高效的方向发展，其中如何提升装备作业质量、充分发挥装备性能，更好地服务于农业生产，将逐步成为行业未来发展所面临的核心问题和关键而持久的挑战。

农机装备与农业生产系统高度耦合是它与其他机械装备间的本质区别。农业生产的复杂性、不确定性、多学科交叉性和高度综合性，增大了农机装备的研发和运用难度。经验总结、试验分析、理论推导、数值仿真等单一手段存在局限性，导致研究人员只能被迫在少数工况下针对个别因素开展分析，无法解决系统性的问题。因此，亟需从系统工程的角度探索一种新的方法：将农机装备置于农业生产背景下，掌握更多关于“人-机器-作物-环境”的信息，从而更加清晰地认识农机装备及其运行过程，指导农机装备设计与运用，进而全方位地提升农机装备性能，更好地满足农业生产需求。

数字孪生引导人们利用新一代信息技术手段，构建伴随现实事物同步进化的虚拟模型，进而以虚拟模型为载体，以数据为驱动力，促进虚拟模型与现实事物的交互融合，从而洞察事物的属性、状态与行为，并提供全生命周期服务[3,4]。数字孪生几乎融合了人类现有的全部认知手段和方法，打破了知识获取途径之间的壁垒，为人类提供了一套认识世界和改造世界的方法论。因此，将数字孪生理念引入农机装备和农业生产领域，有利于建立对农机装备及其作业过程的全面准确认知，有助于农机装备研发制造和运维管控中的提质、增效、降本和减耗。

近年来，国内外学者面向数字孪生理论体系和关键技术已经开展了相关工作[5,6]，农机装备行业也积极与物联网、大数据、云计算、人工智能等数字孪生使能技术融合[7-9]，国家为利用数字孪生技术促进数字经济与实体经济融合创新、推动经济社会高质量发展做出了一系列战略部署[10-12]，开展数字孪生研究应用的内外在条件已经成熟。“十四五”时期是推进农业农村数字化、农机装备产品产业高质量发展的重要战略机遇期，必须顺应时代趋势、把握发展机遇，加快数字孪生技术在农机装备和农业生产领域推广应用，给农业现代化插上科技的翅膀。

基于作者团队前期在农机装备数字孪生方面开展的实践，本文重点阐述数字孪生在农机装备领域的应用。首先，提出农机装备数字孪生的核心理念和体系架构；其次，给出实现农机装备数字孪生的思路；最后，介绍农机装备数字孪生的典型应用场景和案例，以期为数字孪生赋能农机装备和农业机械化生产提供理论和思路参考。

2　数字孪生与农机装备概述

2.1 研究动态

2003 年，Grieves[13] 提出了与数字孪生相近的抽象概念——“与物理产品等价的虚拟数字表达”。2010 年，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）书面提出了数字孪生，描述了航天器数字孪生的概念和功能[14,15]。2012 年，NASA 和美国空军研究实验室（Air Force Research Laboratory，AFRL）共同提出了未来飞行器的数字孪生体范例[16]。2014 年，Grieves 发表了数字孪生白皮书，提出数字孪生三维模型[15]。2017 年，陶飞等[17,18] 提出五维模型和数字孪生车间概念，并建立了数字孪生理论体系。之后，数字孪生受到了学术界和产业界的广泛关注，并迅速发展成为新一轮科技革命和产业变革中各行各业加快数字化转型的重要驱动力量。

在农业领域，Verdouw 等[19,20] 最早建立了数字孪生与农业之间的联系，并通过六个处于雏形发展阶段的案例说明了数字孪生在农业中的应用，同时

还提出了一个用于农场管理的数字孪生概念框架。Pylianidis等[21]调查了2017—2020年中应用于农业的数字孪生案例，提出了数字孪生在农业中应用的路线图，并说明了未来可能面临的困难。

在农机装备领域，西门子公司以农机装备为典型重型装备，采用数字孪生和数字线程方法为企业的产品制造和运维管控提供服务[22]。作者团队依托前期在农机装备的智能化设计理论、关键传感器开发、作物-机器系统建模、装备智能测控、农机装备物联网及大数据分析方面的研究基础，在农机装备数字孪生系统框架、理论体系和关键使能技术等方面，开展了探索性工作[23]。

综上，数字孪生被初步应用于解决复杂系统运维管控和复杂机械装备研发制造等问题，且已体现出显著的实用价值，而农业与农机装备领域中的数字孪生仍处于概念阶段。由于农业生产系统中“人-机器-作物-环境”独特的强耦合关系，其他领域中的数字孪生应用案例仅能作为参考而不能被直接搬用，因此智慧农业与农机装备数字孪生仍需要领域内专业的研究人员参与推进。

2.2 概念与内涵

随着数字孪生不断发展，数字孪生与多个应用领域深度结合并逐步扩展，赋予了数字孪生更广阔的内涵和外延。因此，不同行业、机构对数字孪生存在不同见解，导致相关概念缺乏统一明确的定义[24, 25]。本研究认为，数字孪生并非是具体的一项技术，它是一种实现虚实融合的抽象理念，是多种理论技术的打包整合。具体而言，数字孪生是基于模型的系统工程（Model Based System Engineering，MBSE）和信息物理系统（Cyber Physical System，CPS）的融合，其核心内涵是为现实事物建立“随动”虚拟模型，实现在虚拟空间中对现实事物的全方位精准映射[26]。

基于此，农机装备数字孪生要基于多领域知识、新一代信息技术等先进手段，构建具有多学科、多尺度、多维度等耦合特性的，全面描述农机装备及其作业过程的虚拟模型（图1）。借助物联网、大数据、人工智能等先进技术，以虚拟模型为载体，以数据为驱动力，实现真实农机装备和数字农机装备的同步演化与交互融合，从而建立综合决策能力，解决农机装备全生命周期中的复杂性和不确定性问题。



图1 农机装备数字孪生概念示意图

Fig. 1 Diagram of digital twin for agricultural machinery

在数字孪生相关概念中，现实事物和它相对应的虚拟模型是一对数字孪生体（Digital Twins，DTs）。实现数字孪生核心理念的信息物理系统称为数字孪生系统（Digital Twin System，DTS），它包括现实物体、虚拟模型以及一些衍生品等。根据孪生对象的不同，与农机装备和农业生产相关的数字孪生系统可以分为装备级、场景级和生态级（图2）。其中，装备级数字孪生系统关注装备本身以及与装备发生交互作用的事物，例如拖拉机、收获机的数字孪生系统；场景级数字孪生系统描述特定空间尺度的情境，例如农场、工厂的数字孪生系统；生态级数字孪生针对大规模、全流程的场景，例如农业产业链的数字孪生系统、农机装备产业链的数字孪生系统。本研究聚焦农机装备数字孪生系统，重点关注农机装备及其作业过程。

2.3 系统框架

依据农机装备数字孪生的概念和内涵，以数字孪生五维模型[17]作为农机装备数字孪生的基础，提出了如图3所示的系统框架，包括物理实体、虚拟模型、数据与连接、系统服务、业务应用五个部分。

上述框架中，物理实体是数字孪生的现实对象，即在真实空间中的农机装备和作业场景，具备感知与执行两个核心功能。虚拟模型是物理实体在

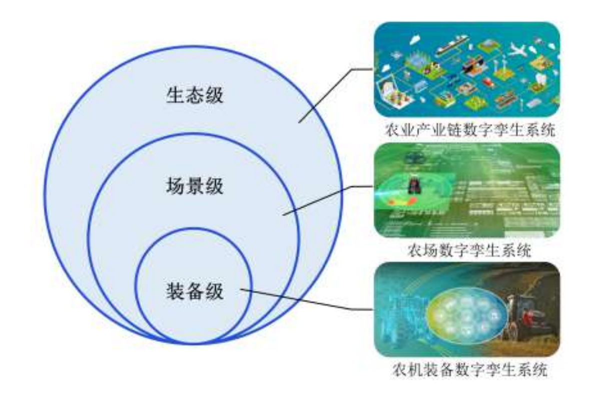


图2 三个层级的数字孪生系统

Fig. 2 Digital twin system in three levels

虚拟空间中的数字副本，伴随物理实体一同演化，既是对物理实体的表达还原，也是承载全生命周期信息的载体。数据是构建、驱动、更新虚拟模型的依据，连接是实现各要素间信息交换的前提，数据和连接二者相互依存，因此将数据与连接视为统一整体，且处于框架的核心地位。支撑服务包括维持数字孪生系统稳定运行的数据服务、模型服务、系统服务等基础功能。业务应用是数字孪生的落地，是构建数字孪生的出发点和落脚点。

农机装备数字孪生系统的运行机制为：物理实体获得感知数据，支撑服务完成数据处理、管理、挖掘和融合，以及模型验证、校正、更新和管理。基于各种农业业务应用需求，运用虚拟模型开展不同尺度、粒度、用途、模式的仿真，并将结果反馈至业务应用。业务应用基于仿真结果做出分析、预测、优化、决策等，并交由物理实体付诸实施，从而为农机装备全生命周期提供服务。运行过程中的所有信息交互都以数据与连接作为中间介质，支撑服务中的系统服务为整个数字孪生系统的运行提供保障。

结合数字孪生系统运行逻辑，从具体实施的角度，提出农机装备数字孪生系统的组织架构，如图4所示。该架构从物理层出发，以平台层为基础，以模型数据层为核心，以服务层为支撑，自下而上层层递进，最终实现监测、预测、评估、决策、控制等多种功能，服务于农机装备设计制造、运维管控、回收利用等全生命周期中的各个环节。

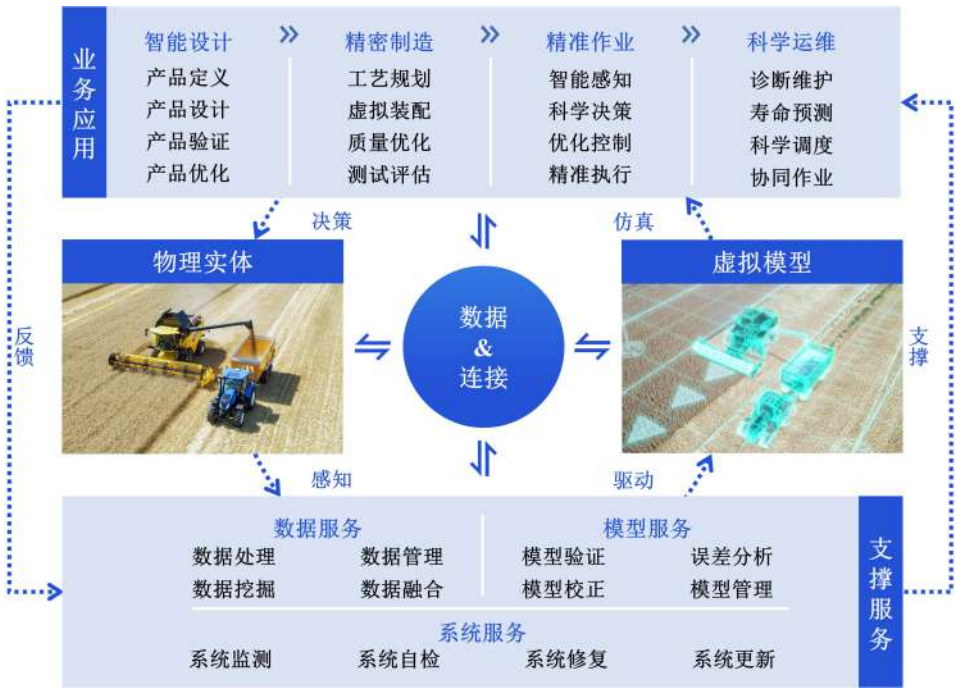


图3 农机装备数字孪生系统框架

Fig. 3 Framework of digital twin system for agricultural machinery

3 农机装备数字孪生实现思路

农机装备数字孪生尚处于概念阶段，需要相当长时间的发展才能逐渐完善。为了更好地推动农机装备数字孪生的研究与应用，结合相关理论和实践经验，给出以下实现思路。



图4　农机装备数字孪生系统组织架构

Fig. 4 Organization structure of digital twin system for agricultural machinery

3.1 宏观发展路线

从数字孪生概念提出到应用落地的宏观发展角度，农机装备数字孪生发展过程中需要经历理论探索、实践应用和总结凝练三个阶段，如表1所示。

表1　农机装备数字孪生三个发展阶段

Table 1 Three developmental stages of digital twin for agricultural machinery

发展阶段	主要任务
理论探索	明确农机装备数字孪生目的、意义、架构、使能技术
实践应用	面向应用需求构建农机装备数字孪生系统，基于农机装备数字孪生解决多个场景中的具体问题
总结凝练	形成农机装备数字孪生理论技术体系，制定标准规范

（1）理论探索。该阶段是为农机装备数字孪生今后的发展奠定基础的关键阶段，主要任务是回答以下重要问题：农机装备领域需要什么样的数字孪生？农机装备数字孪生应包含哪些内容？如何实现农机装备数字孪生？研究人员需要依据数字孪生的核心理念，紧密结合现代先进农机装备和农业生产的需求和发展趋势，参考其他领域现有数字孪生案例，确定农机装备数字孪生架构，以及实现方法与核心技术，然后规划具体的实施路线。

（2）实践应用。该阶段是构建农机装备数字孪生，并落地实用的关键阶段。理想的数字孪生应从不同的维度、尺度、领域等方面尽可能完整地描述“人-机器-作物-环境”系统，从而能够真实、彻底地反映农机装备的实际状态、工作机理和运行机制。但是在实际情况中，技术和成本往往不足以支持数字孪生从无到全的直接实现。因此，应遵循农机装备数字孪生框架，面向由低层级到高层级的应用需求，逐步开展数字孪生构建方法研究，开发满足每个阶段具体需求的数字孪生，在此过程中逐渐积累数字化资产，实现从局部到全面的数字化映射，填充数字孪生模型库，丰富数字孪生业务应用，完善整个农机装备数字孪生的内容，扩展数字孪生的深度和广度。在应用过程中，应充分发挥虚实交互与融合的优势，整合农机装备数字孪生的功

能，着力解决痛点问题，促进智慧农业生产落地实现。

（3）完善凝练。在农机装备数字孪生成功运用于实际生产，并取得了良好的收益之后，数字孪生进入完善凝练阶段。该阶段是对农机装备数字孪生的进一步发展，标志着数字孪生理念已经在农业机械化生产领域落地并走向成熟。通过该阶段，总结先前探索和实践过程中遇到的问题，完善农机装备数字孪生理论技术架构，提炼构建和应用农机装备数字孪生的通用方法，形成可以指导进一步推广应用的完整体系，同时制定用于规范后续工作的相关标准。

3.2 具体实现路线

3.2.1 数字孪生系统实现路线

农机装备数字孪生的具体实现路线是不断完善和发展虚拟模型的数字化映射能力，扩充和丰富数字孪生服务的过程。从数字孪生系统实现的角度，实现过程包括农机装备智能化升级、开辟信息交互通路、构建数字孪生虚拟模型和开发数字孪生业务应用四个关键步骤，最终形成如图5所示的闭环运行。



图5 农机装备数字孪生系统的闭环运行机制

Fig. 5 Closed-loop operation mechanism of digital twin system for agricultural machinery

（1）农机装备智能化升级。农机装备的智能化升级是系统实现的准备工作。基于线控底盘、现场总线、智能传感等技术，完善农机装备物理实体的感知与执行功能，包括但不限于：①开发基于现场总线的线控底盘；②开发基于现场总线的传感采集系统。

（2）开辟信息交互通路。基于物联网技术，建立农机装备与服务器间的双向通信，打通数字孪生感知通路和控制通路，是系统实现的首要工作，包括但不限于：①选定或开发联网终端设备，实现终端设备与农机装备和服务器间的双向通信；②开发农机装备数字孪生物联网平台，用于注册、接入和管理农机装备；③开发实时监测功能，实现对农机装备实时数据的获取与存储，通过长时间运行，为后续开发工作积累农机装备运行数据资源。

（3）构建数字孪生虚拟模型。构建农机装备数字孪生虚拟模型，通过数据驱动模型实时快速仿真，实现虚拟模型伴随真实农机装备同步运行，是系统实现的核心工作，具体包括：①基于分布式数据流处理平台，开发数据处理算法，建立数据治理机制，为虚拟模型构建等工作提供数据算法和资源支撑；②运用多种建模手段和多学科知识构建描述农机装备及作业环境，并实现子模型间的有效组织和融合，集成构建多源、多维、多尺度、多领域的数字孪生虚拟模型；③利用模型降阶技术和可视化技术，实现虚拟模型在数据驱动下的实时仿真；④开发数字孪生虚实一致性评价方法和虚拟模型校验更新方法，实现虚拟模型伴随真实农机装备的同步演化；⑤综合考虑可信度、保真度、易用度、轻量化等多个方面，提出数字孪生虚拟模型综合评价方法，选定典型工况，开展虚拟模型验证试验，并进行评价、优化和改进。

（4）开发数字孪生业务应用。农机装备数字孪生系统具备实时监测、评估诊断、优化决策、智能控制四个层级的业务功能，形成由物理世界到虚拟世界，最后回到物理世界的闭环自主运行机制。数字孪生系统在逐一实现每个层级功能的过程中不断完善。在实现完全闭环之前，需要发挥人的作用作为补充。

层级I：状态监测。状态监测是数字孪生最初级的功能，具体效果是数字孪生具备全面感知能力，能够以虚映实。在空间尺度上，既可以反映事物的外在行为，也可以呈现内在的、难以观测到的行为与特征。在时间尺度上，既可以在线监测实时状态，也可以追溯复现历史状态。同时，系统提供一个可视化、可交互的用户界面，采用三维模型、二维图表等方式直观动态展示农机装备运行的状态

和参数。

层级Ⅱ：评估诊断。一方面充分利用孪生数据和模型，可以实现对农机装备状态的评估诊断，具体有三条途径：①直接将感知数据用于评估诊断；②挖掘感知数据中隐含的状态信息用于评估诊断；③借助高保真的虚拟模型仿真，扩充机器状态信息，再用于评估诊断。另一方面，评估诊断的依据可以来自人为经验或者理论模型，也可以来自数据分析得到的知识。这一层级可以实现的效果是，数字孪生具备认知能力，能够判断农机装备和周围环境的状态，或预判未来可能出现的状况等。

层级Ⅲ：优化决策。针对评估和诊断中发现的问题，快速形成若干套解决方案，然后结合虚拟模型验证和评价方案，最后实现方案整合和优化，从而形成基于人类经验、数据知识和实时仿真的综合优化决策。这一层级可以实现的效果是，数字孪生具备完善自主决策能力，可以自主提出应对需求变化的最优方案，提高农机装备的自适应能力。

层级Ⅳ：智能控制。将优化决策的结果形成控制指令，自主控制物理对象行为。这一层级可以实现的效果是，数字孪生可以准确可靠地自主执行决策方案。至此，数字孪生已具备所有功能，可以自主闭环运行，无需人为干涉。

此外，农机装备数字孪生系统长时间闭环运行能够积累大量的数据和模型资源，充分利用这些资源服务于农机装备设计开发、制造测试、田间作业、运维管控等全生命周期中的各个环节。

3.2.2 数字孪生项目实施路线

农机装备数字孪生项目的实现路线包括预研、规划、实现和评估四个阶段，如图6所示。

（1）预研阶段。数字孪生的开发需要花费大量的精力和资源，同时农机装备和农业生产对风险和



图6　农机装备数字孪生项目的实施路线

Fig. 6 Implementation route of digital twin project of agricultural machinery

成本十分敏感。因此，预研阶段中首先要明确目标农机装备、生产场景和需求问题，评估数字孪生可行性和适用性，并预估投资回报，为项目的实施和应用提供坚实的依据。

（2）规划阶段。深入分析目标农机装备和生产场景的特征，设计项目具备的核心业务功能和预计达到的效果，确定数字孪生虚拟模型涉及的维度、尺度、领域和重点关注的内容，明确系统需要遵循的协议和标准，提出合理的数字孪生系统架构。

（3）实现阶段。构建数字孪生的物理实体、虚拟模型、数据与连接、系统服务和业务应用五个要素，集成构建数字孪生系统，完善各项业务功能，最后进行调试和完善。

（4）评估阶段。将数字孪生投入实际业务应用，评估数字孪生的应用效果和收益是否达到预期，为系统的维护改进和后续数字孪生的开发和应用提供参考。

4　农机装备数字孪生应用场景

农机装备数字孪生能够建立农机装备与智慧农业之间的纽带和桥梁，有利于更加清晰地认识农业生产过程、农机装备运行过程及二者耦合作用（图7），既能使农机装备的设计制造回归农业生产现实背景，支撑农机装备先进制造能力提升，又能促进农业生产的运维管控更加贴合实际，加速智慧农业落地实用。



图7　农机装备数字孪生两大应用场景

Fig. 7 Two major application scenarios of digital twin for agricultural machinery

4.1 设计制造

农机装备的设计制造通常存在以下问题：研发人员没有充分、及时掌握真实的用户需求和装备应用阶段中的问题，造成设计目标不准确，无法对产

品进行针对性的优化改进；传统研发模式完全依赖经验判断和实机运行效果迭代，同时试验过程的安全性难以保证，导致研发成本高、周期长。

农机装备数字孪生可以改善装备设计研发和实际运用之间的信息壁垒和数据孤岛问题，从而减少上述产品定义、设计目标不准确，设计与个性化应用脱节等现象，实现对农机装备设计的指导，提高研发设计的一次成功率，如图8所示。首先，数字孪生通过积累真实农机装备运行数据和模型，可以对装备的使用情况进行准确评估。其次，利用数字孪生虚拟模型可以针对典型使用场景开展仿真优化，实现设计和运用的融合，使产品设计在功能、性能、经济性上更符合应用场景的需求，提高产品改进型的功能易用性和运行可靠性。同时，数字孪生模型和数据中蕴含了大量知识，可以辅助生成设计方案，指导装备设计。最后，借助高保真数字孪生虚拟模型开展仿真试验，可以实现对装备的虚拟化验证和调试，满足静态参数、动态参数的调试需求。

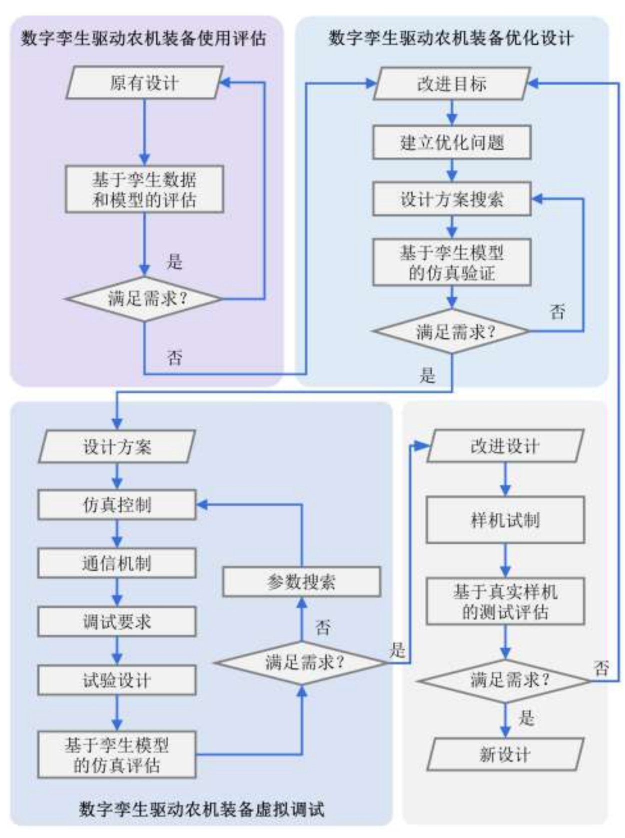


图8 数字孪生赋能农机装备设计

Fig. 8 Digital twin empowerment manufacturing of agriculture machinery

4.2 运维管控

农机装备运行使用过程中通常存在以下问题：农场和个人用户普遍重使用、轻维护，维护制度不健全，维护模式落后，农机装备发生故障的几率大，一旦出现故障，将延误农业生产；农业机械装备专业运维人员少，配套设施不完全，依赖农机装备厂家提供服务；农机装备维修依赖经验，故障排除时间长，很多潜在问题无法准确定位或彻底根除；农机装备对生产环境和生产任务适应性不足，难以发挥出应有的效能。

农机装备数字孪生系统可实现对农机装备的全面智能运维，如图9所示。首先，通过数字孪生系统的历史数据和模型，可复现农机装备故障场景，迅速判别和定位故障原因。其次，通过数字孪生可建立农机装备关键零部件寿命衰减模型，结合使用过程记录，实现剩余寿命估计和预测性维护。另外，利用数字孪生的仿真评估可以快速形成最优的故障排除方案。此外，利用数字孪生对生产环境、生产任务和设备状态的动态映射更新能力，可以制定科学精准的运行优化策略，解决农机装备对复杂多变的生产条件动态适应能力不足的问题。

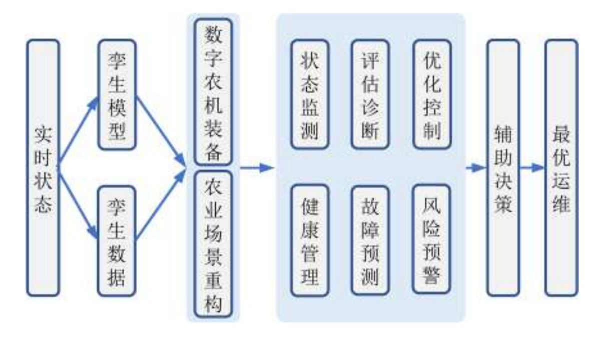


图9 数字孪生赋能农机装备运维管控

Fig. 9 Digital twin empowerment operation and maintenance of agriculture machinery

4.3 典型案例

基于上述对数字孪生农机装备的研究，作者团队针对利用数字孪生提升农机装备的作业质量这一关键问题，分别以大马力拖拉机和大型联合收获机为对象，开展了数字孪生研究工作。

4.3.1 大马力拖拉机数字孪生

大马力拖拉机性能优越，生产效率高，可进行

大规模深松、深耕作业。随着土地集约化进程的发展，大马力拖拉机的数量迅速增加。面向大马力拖拉机的农业生产过程，作者团队提出了数字孪生体构建方法，并阐述了其运行机制。如图10所示，通过物理拖拉机、虚拟拖拉机的双向映射与交互，在拖拉机孪生数据的驱动下，可实现拖拉机设计、制造、运维的迭代运行优化。

为了验证所提方法的有效性，以犁耕作业为例，通过部署大马力拖拉机、中心服务器、物联网平台，开发智能农机装备农业生产系统数字孪生服务平台，构建拖拉机数字孪生体，实现了基于数字孪生的犁耕作业质量预测和闭环控制。结果显示所提出的方法可以有效准确地预测和提升作业质量，研究细节请参考文献［23］。

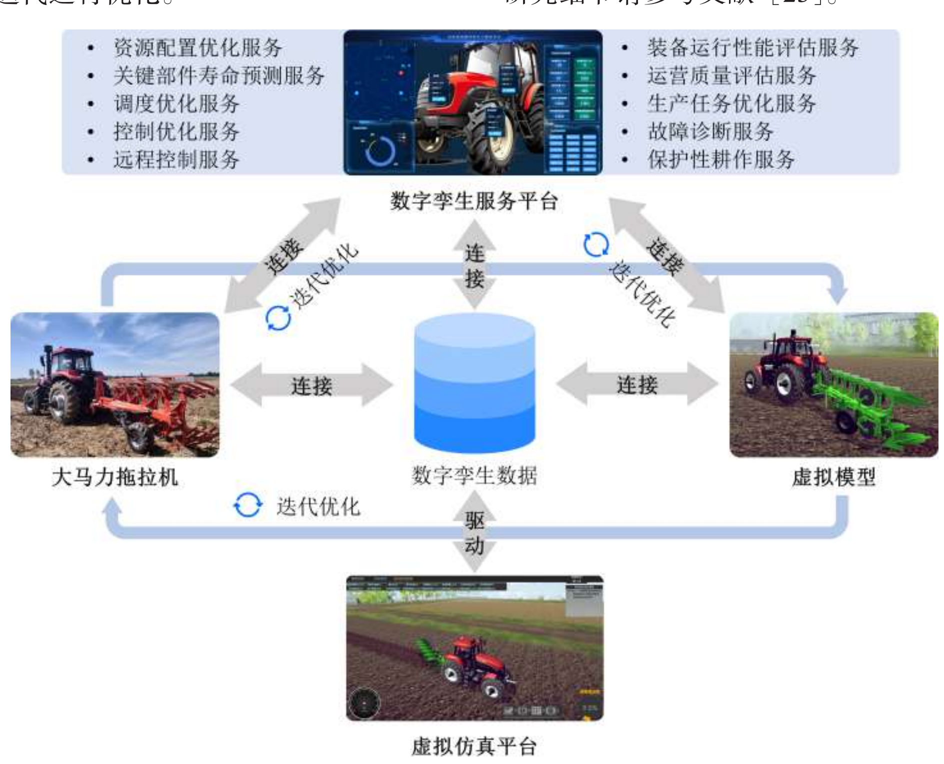


图10　大马力拖拉机的数字孪生案例

Fig. 10 Digital twin case of high-horsepower tractor

4.3.2　大型联合收获机数字孪生

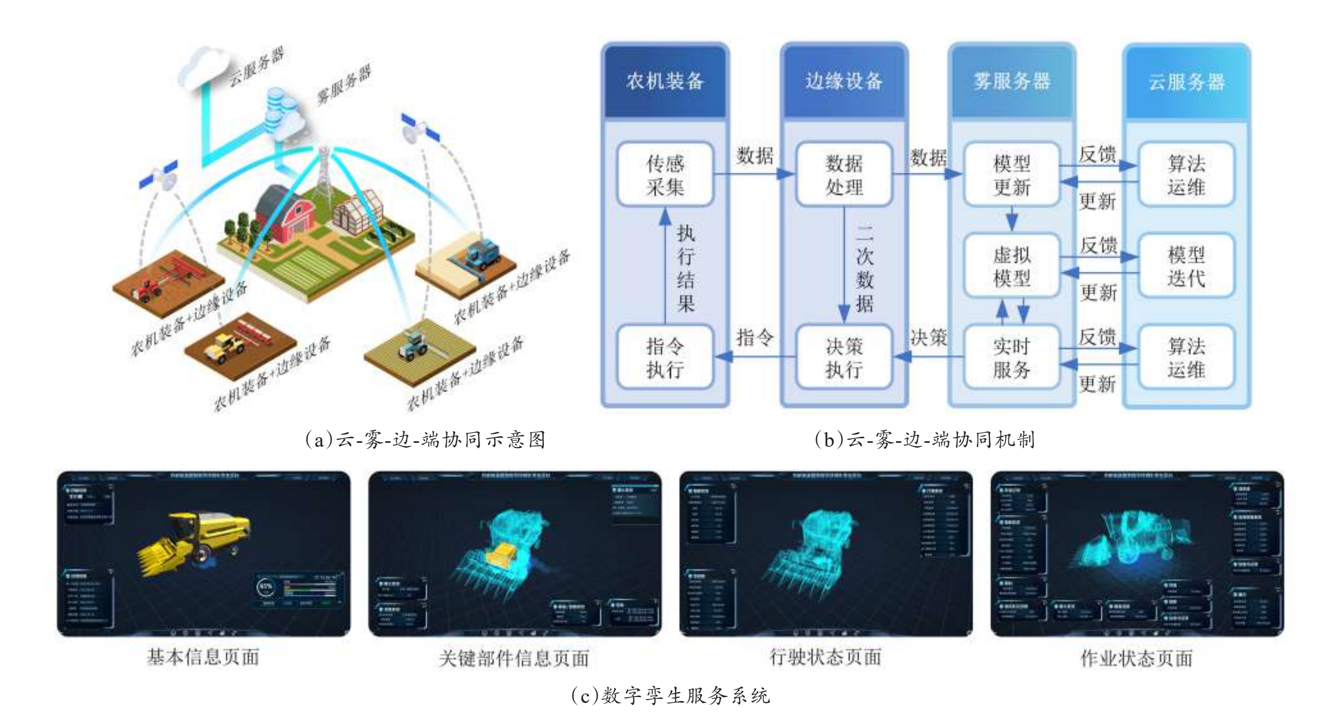
针对构建农机装备数字孪生缺乏实用化的系统级解决方案和典型应用案例的问题，作者团队基于数字孪生和农机装备的特点，融合移动边缘计算技术，提出一种“云-雾-边-端”协同的数字孪生系统架构与运行机制（图11（a）和图11（b）），通过将琐碎的低算力数据处理任务和高实时性需求的孪生服务部署到更靠近农机装备一侧，有助于实现数字孪生系统的快速部署、高效运行、云端协同和有机统一。

为了验证方法的有效性，以籽粒直收型玉米联合收获机为对象，针对脱粒过程中籽粒破碎率高的问题，开发大型联合收获机的数字孪生服务系统（图11（c）），实现模型预测、模型更新、实时监测和优化决策等功能，并开展田间试验。试验表明，数字孪生系统有效提高了虚拟模型的适应能力，使虚拟模型保持良好的预测效果；基于数字孪生的决策优化方法有效降低了籽粒破碎率,研究细节请参考文献［27］。

5　总结与展望

数字孪生为农机装备转型升级提供了新方法，为提升农业机械化生产水平提供了新途径，为实现智慧农业提供了新思路。本文阐述了农机装备数字孪生的概念内涵和系统框架，给出了具体和宏观角度的实现思路，描述了具体应用场景和典型案例。

但是，农机装备数字孪生仍处于起步阶段，存在一系列的问题有待探索，例如数字孪生顶层设计



(a)云-雾-边-端协同示意图　(b)云-雾-边-端协同机制

(c)数字孪生服务系统

图11　大型联合收获机的数字孪生案例

Fig. 11 Digital twin cases of large combine harvester

仍有待完善，需要探索适用于所有农机装备的统一框架、标准、理论和方法；数字孪生的关键技术有待突破，其中如何为复杂农机装备构建虚拟模型是最核心的问题；数字孪生的落地实用有待探索，如何降低数字孪生的应用成本，并带来可观收益，是数字孪生在农机装备行业推广应用的关键。

利益冲突声明： 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] 国务院. 国务院关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2019(1): 34-39.
The State Council of the People's Republic of China. Guiding opinions of the state council on accelerating agricultural mechanization and the transformation and upgrading of the agricultural machinery and equipment industry[J]. Gazette of the state council of the People's republic of China, 2019(1): 34-39.

[2] 李克强. 政府工作报告——2023年3月5日在第十四届全国人民代表大会第一次会议上[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2023(8): 5-19.
LI K Q. Government work report—At the first session of the 14th national People's congress on March 5th, 2023[J]. Gazette of the state council of the People's republic of China, 2023(8): 5-19.

[3] TAO F, ZHANG M, NEE A Y C. Digital twin driven smart manufacturing[M]. San Diego: Academic Press, 2019.

[4] 陶飞, 戚庆林, 张萌. 数字孪生及车间实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
TAO F, QI Q L, ZHANG M. Digital twin and its application in shop-floor[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.

[5] KRITZINGER W, KARNER M, TRAAR G, et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(11): 1016-1022.

[6] LIU M N, FANG S L, DONG H Y, et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications[J]. Journal of manufacturing systems, 2021, 58: 346-361.

[7] 罗锡文, 廖娟, 邹湘军, 等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 1-14.
LUO X W, LIAO J, ZOU X J, et al. Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2016, 32(20): 1-14.

[8] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1-18.
LIU C L, LIN H Z, LI Y M, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2020, 51(1): 1-18.

[9] 陈学庚, 温浩军, 张伟荣, 等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 1-16.
CHEN X G, WEN H J, ZHANG W R, et al. Advances and

progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart agriculture, 2020, 2(4): 1-16.

[10] 中国网信网. 中央网络安全和信息化委员会印发《"十四五"国家信息化规划》[EB/OL]. [2023-05-05]. http://www.cac.gov.cn/2021-12/27/c_1642205312337636.htm

[11] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发"十四五"信息化和工业化深度融合发展规划的通知 [EB/OL]. [2023-05-05]. http://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-12/01/content_5655208.htm.

[12] 工业和信息化部, 国家发展和改革委员会, 教育部, 等. 八部门关于印发《"十四五"智能制造发展规划》的通知 [EB/OL]. [2023-05-05]. http://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664996.htm.

[13] GRIEVES M. Virtually perfect: Driving Innovative and lean products through product lifecycle management[M]. Cocoa Beach: Space Coast Press, 2011

[14] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Draft modelling, simulation, information technology & processing roadmap[M/OL]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2010 [2023-04-10]. https://www. nasa. gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf.

[15] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap[J]. National aeronautics and space administration, 2012, 32(2012): 1-38.

[16] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future *NASA* and U. S. air force vehicles[C]// Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics & Materials Conference Aiaa/asme/ahs Adaptive Structures Conference Aiaa. Reston, Virigina, USA: AIAA, 2012.

[17] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2019, 25(1): 1-18.

[18] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
TAO F, ZHANG M, CHENG J F, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2017, 23(1): 1-9.

[19] VERDOUW C N, KRUIZE J W. Digital twins in farm management: Illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals[C]// The International Tri-Conference for Precision Agriculture in 2017. Hamilton, New Zealand: Wageningen University, 2017.

[20] VERDOUW C, TEKINERDOGAN B, BEULENS A, et al. Digital twins in smart farming[J]. Agricultural systems, 2021, 189: ID 103046.

[21] PYLIANIDIS C, OSINGA S, ATHANASIADIS I N. Introducing digital twins to agriculture[J]. Computers and electronics in agriculture, 2021, 184: ID 105942.

[22] Siemens. Digital enterprise industry solutions for agricultural OEMs[EB/OL]. [2023-05-05]. https://www.plm.automation. siemens. com/global/en/industries/heavy-equipment/agriculture/.

[23] ZHANG Y N, DU Y F, YANG Z H, et al. Construction method of high-horsepower tractor digital twin[J]. Digital twin, 2022, 2: ID 12.

[24] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 1-10.
ZHANG L. Cold thinking about digital twinning and the modeling and simulation technology behind it[J]. Journal of system simulation, 2020, 32(4): 1-10.

[25] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.
ZHANG L, LU H. Discussing digital twin from of modeling and simulation[J]. Journal of system simulation, 2021, 33(5): 995-1007.

[26] 宋学官, 来孝楠, 何西旺, 等. 重大装备形性一体化数字孪生关键技术[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 298-325.
SONG X G, LAI X N, HE X W, et al. Key technologies of shape-performance integrated digital twin for major equipment[J]. Journal of mechanical engineering, 2022, 58(10): 298-325.

[27] 郭大方, 杜岳峰, 栗晓宇, 等. 云-雾-边-端协同的农业装备数字孪生系统研究[J/OL]. 农业机械学报: 1-13 [2023-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20230705.1051.012.html.
GUO D F, DU Y F, LI X Y, et al. Digital twin system for agricultural machinery with cloud-fog-edge-terminal architecture[J/OL]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery: 1-13 [2023-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.2023070 5.1051.012.html.

Digital Twin for Agricultural Machinery: From Concept to Application

GUO Dafang[1,2], DU Yuefeng[1,2*], WU Xiuheng[1,2], HOU Siyu[1,2], LI Xiaoyu[1,2], ZHANG Yan'an[1,2], CHEN Du[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract:

[Significance] Agricultural machinery serves as the fundamental support for implementing advanced agricultural production concepts. The key challenge for the future development of smart agriculture lies in how to enhance the design, manufacturing, operation, and maintenance of these machines to fully leverage their capabilities. To address this, the concept of the digital twin has emerged as an innovative approach that integrates various information technologies and facilitates the integration of virtual and real-world interactions. By providing a deeper understanding of agricultural machinery and its operational processes, the digital twin offers solutions to the complexity encountered throughout the entire lifecycle, from design to recycling. Consequently, it contributes to an all-encompassing enhancement of the quality of agricultural machinery operations, enabling them to better meet the demands of agricultural production. Nevertheless, despite its significant potential, the adoption of the digital twin for agricultural machinery is still at an early stage, lacking the necessary theoretical guidance and methodological frameworks to inform its practical implementation.

[Progress] Drawing upon the successful experiences of the author's team in the digital twin for agricultural machinery, this paper presents an overview of the research progress made in digital twin. It covers three main areas: The digital twin in a general sense, the digital twin in agriculture, and the digital twin for agricultural machinery. The digital twin is conceptualized as an abstract notion that combines model-based system engineering and cyber-physical systems, facilitating the integration of virtual and real-world environments. This paper elucidates the relevant concepts and implications of digital twin in the context of agricultural machinery. It points out that the digital twin for agricultural machinery aims to leverage advanced information technology to create virtual models that accurately describe agricultural machinery and its operational processes. These virtual models act as a carrier, driven by data, to facilitate interaction and integration between physical agricultural machinery and their digital counterparts, consequently yielding enhanced value. Additionally, it proposes a comprehensive framework comprising five key components: Physical entities, virtual models, data and connectivity, system services, and business applications. Each component's functions operational mechanism, and organizational structure are elucidated. The development of the digital twin for agricultural machinery is still in its conceptual phase, and it will require substantial time and effort to gradually enhance its capabilities. In order to advance further research and application of the digital twin in this domain, this paper integrates relevant theories and practical experiences to propose an implementation plan for the digital twin for agricultural machinery. The macroscopic development process encompasses three stages: Theoretical exploration, practical application, and summarization. The specific implementation process entails four key steps: Intelligent upgrading of agricultural machinery, establishment of information exchange channels, construction of virtual models, and development of digital twin business applications. The implementation of digital twin for agricultural machinery comprises four stages: Pre-research, planning, implementation, and evaluation. The digital twin serves as a crucial link and bridge between agricultural machinery and the smart agriculture. It not only facilitates the design and manufacturing of agricultural machinery, aligning them with the realities of agricultural production and supporting the advancement of advanced manufacturing capabilities, but also enhances the operation, maintenance, and management of agricultural production to better meet practical requirements. This, in turn, expedites the practical implementation of smart agriculture. To fully showcase the value of the digital twin for agricultural machinery, this paper addresses the existing challenges in the design, manufacturing, operation, and management of agricultural machinery. It expounds the methods by which the digital twin can address these challenges and provides a technical roadmap for empowering the design, manufacturing, operation, and management of agricultural machinery through the use of the digital twin. In tackling the critical issue of leveraging the digital twin to enhance the operational quality of agricultural machinery, this paper presents two research cases focusing on high-powered tractors and large combine harvesters. These cases validate the feasibility of the digital twin in improving the quality of plowing operations for high-powered tractors and the quality of grain harvesting for large combine harvesters.

[Conclusions and Prospects] This paper serves as a reference for the development of research on digital twin for agricultural machinery, laying a theoretical foundation for empowering smart agriculture and intelligent equipment with the digital twin. The digital twin provides a new approach for the transformation and upgrade of agricultural machinery, offering a new path for enhancing the level of agricultural mechanization and presenting new ideas for realizing smart agriculture. However, existing digital twin for agricultural machinery is still in its early stages, and there are a series of issues that need to be explored. It is necessary to involve more professionals from relevant fields to advance the research in this area.

Key words: agricultural machinery; digital twin; information technology; virtual simulation; smart agriculture